

## Пьезоэлектрические свойства и родственные параметры новых 1–2–2-компози́тов на основе кристаллов типа PZN–xPT

В.Ю. Тополов<sup>1</sup>, А.Н. Исаева<sup>1</sup>, К.Р. Бауэн<sup>2</sup>, Б.О. Проценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Физический факультет, 344090 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: vutopolov@sfnu.ru

<sup>2</sup>Университет Бата, BA2 7AY, Бат, Соединенное Королевство

С 2000-х годов кристаллы твердых растворов релаксоров-сегнетоэлектриков  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$  (PMN–xPT),  $(1-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - x\text{PbTiO}_3$  (PZN–xPT) и др., поляризованные вдоль определенного кристаллографического направления, используются как компоненты пьезоактивных композитов со связностью 1–3 [1, 2] и обеспечивают высокие значения пьезомодулей  $d_{3j}^*$ , коэффициентов электромеханической связи  $k_{3j}^*$ ,  $k_t^*$  и других параметров композитов. Модификация структуры и микрогеометрии композитов типа 1–3 [3] влияет на их эффективные физические свойства и другие параметры, представляющие интерес для практических применений. Одним из важных примеров модификации структуры является 1–2–2-компо́зит, предложенный авторами [4, 5]. Цель настоящего сообщения – показать влияние слоистой полимерной матрицы и кристаллического компонента на эффективные пьезоэлектрические свойства, их анизотропию и другие параметры композитов со связностью 1–2–2.

Исследуемый 1–2–2-компо́зит (Рис. 1) представляет собой систему протяженных параллельных кристаллических стержней с квадратными основаниями и спонтанной поляризацией  $\mathbf{P}_s^{(1)} \parallel OX_3$ , которые регулярно расположены в матрице “полимер I – полимер II” со связностью 2–2. Эффективные упругие, пьезо- и диэлектрические свойства композита определяются как функции объемных концентраций кристалла  $m$  и полимера I  $m_s$  по матричному методу [3–5]. При этом используются полные наборы электромеханических констант кристаллов, поляризованных вдоль [001], и полимеров. Среди кристаллов с важными пьезоэлектрическими свойствами представляют интерес свинец-содержащие PZN–xPT, PMN–xPT и бессвинцовый  $[\text{Li}_x(\text{K}_{1-y}\text{Na}_y)_{1-x}](\text{Nb}_{1-z}\text{Ta}_z)\text{O}_3:\text{Mn}$  (KNNTL–Mn). Проведено сравнение расчетных параметров отдельных 1–2–2-компози́тов с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов [4].

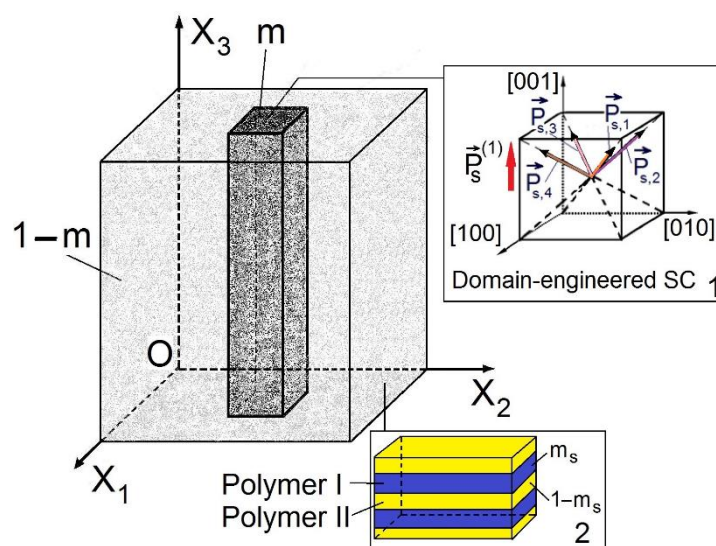


Рисунок 1. Схематическое изображение фрагмента 1–2–2-компози́та «СЭ кристалл – полимер I – полимер II» [5]. На вставке 1 показаны типы не 180°-ных доменов в кристалле, поляризованном вдоль [001] перовскитовой ячейки; на вставке 2 – слоистая структура, содержащая два типа полимеров.  $m$  и  $m_s$  – объемные концентрации кристалла в композите и полимера I в матрице композита, соответственно.

Анализ концентрационных зависимостей эффективных пьезомодулей  $d_{3j}^*$ , пьезокоэффициентов  $g_{3j}^*$ , коэффициентов электромеханической связи  $k_{3j}^*$  и связанных с ними факторов анизотропии  $\zeta_d^* = d_{33}^* / d_{31}^* = g_{33}^* / g_{31}^*$  и  $\zeta_k^* = k_{33}^* / k_{31}^*$  1–2–2-композитов показывает, что важными в практическом смысле являются интервалы объемных концентраций  $m = 0.05 \dots 0.2$  и  $m_s = 0.2 \dots 0.5$ . В данных интервалах достигаются высокие значения  $d_{33}^* \sim (10^2 \dots 10^3)$  пКл / Н,  $g_{33}^* \sim (10^2 \dots 10^3)$  мВ·м / Н,  $k_{33}^* \approx 0.8 \dots 0.9$ , а факторы анизотропии удовлетворяют условиям  $|\zeta_d^*| \geq 5$  и  $|\zeta_k^*| \geq 5$  (Рис. 2). Отметим, что бессвинцовый 1–2–2-композит на основе кристалла KNNTL-Mn с меньшим пьезомодулем  $d_{33}$  характеризуется большей анизотропией  $|\zeta_d^*|$  и  $|\zeta_k^*|$  (кривые 4, 5 на Рис. 2б) по сравнению с композитами на основе кристаллов PZN–0.08РТ (кривые 4, 5 на Рис. 2а), PMN–0.33РТ и т.п. Приведенный выше интервал значений  $m$  указывает на то, что слоистая матрица (Рис. 1) занимает значительный объем композитного образца, а упругие свойства данной матрицы [5] способны влиять на пьезоэлектрический отклик композита и анизотропию его свойств. Интерпретация результатов по 1–2–2-композитам проведена с учетом зависящих от объемной концентрации  $m_s$  упругих свойств слоистой матрицы, содержащей полимерные компоненты с заметно различающимися упругими свойствами.

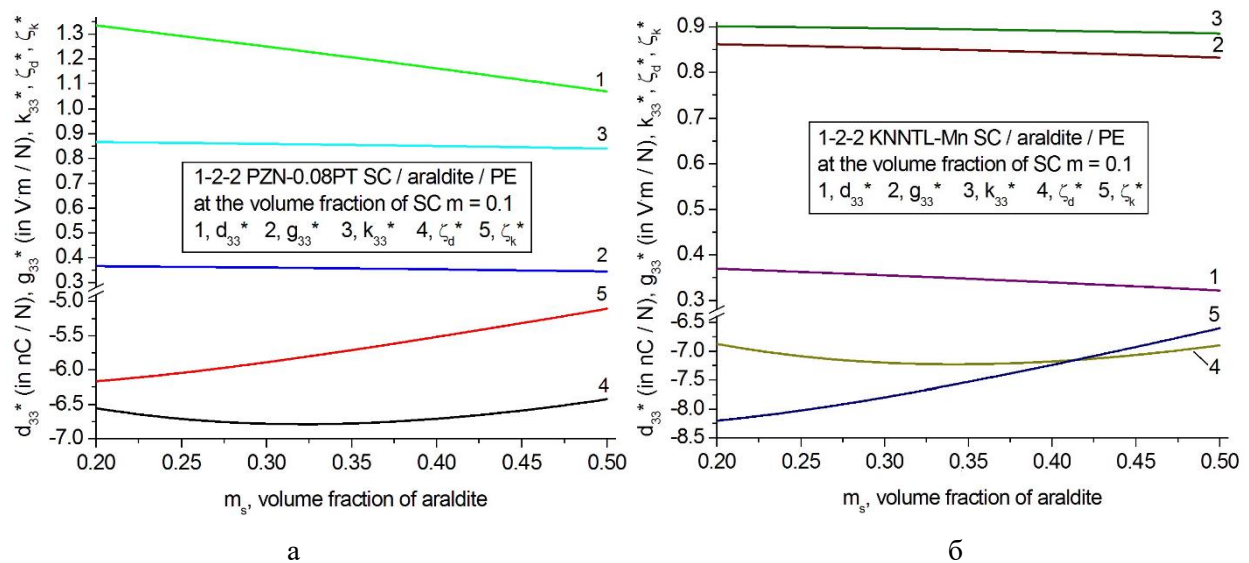


Рисунок 2. Концентрационные ( $m_s$ ) зависимости продольных пьезокоэффициентов  $d_{33}^*$  (кривая 1),  $g_{33}^*$  (кривая 2), коэффициента электромеханической связи  $k_{33}^*$  (кривая 3) и факторов анизотропии  $\zeta_d^*$  (кривая 4) и  $\zeta_k^*$  (кривая 5) 1–2–2-композитов «кристалл PZN–0.08РТ – аральдит – полиэтилен» (а) и «кристалл KNNTL-Mn – аральдит – полиэтилен» (б) при объемной концентрации кристалла  $m = 0.1$ .

Полученные результаты следует учитывать при создании современных пьезоактивных композитов типа 1–3, представляющих интерес как активные элементы преобразователей, сенсоров, акустических и других устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90163.

1. T. Ritter, X. Geng, K.K. Shung et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **47**, 792 (2000).
2. F. Wang, C. He, Y. Tang, *Mater. Chem. Phys.* **105**, 273 (2007).
3. V.Yu. Topolov, C.R. Bowen, P. Bisegna, *Piezo-Active composites. Microgeometry – Sensitivity Relations* (Cham: Springer International), 62 (2018).
4. C.R. Bowen, V.Yu. Topolov, A.N. Isaeva, P. Bisegna, *CrystEngComm* **18**, 5986 (2016).
5. V.Yu. Topolov, C.R. Bowen, A.N. Isaeva, A.A. Panich, *Phys. Stat. Solidi A* **215**, 1700548 (2018).